

Aerodynamika w konstruowaniu, budowie i eksploatacji pojazdów szynowych

Zwiększenie prędkości jazdy wyłoniło nowe problemy techniczne w zakresie zmniejszenia oporów powietrza, ograniczenia hałasu i zapewnienia bezpieczeństwa ruchu pociągów. W artykule przedstawiono główne problemy aerodynamiki pociągów i sposoby ich rozwiązywania.

1. WSTĘP

Aerodynamika pojazdów szynowych, stosowana od wielu lat w rozwiniętych krajach świata, nareszcie zaczyna budzić zainteresowania również w Polsce [1-3, 6].

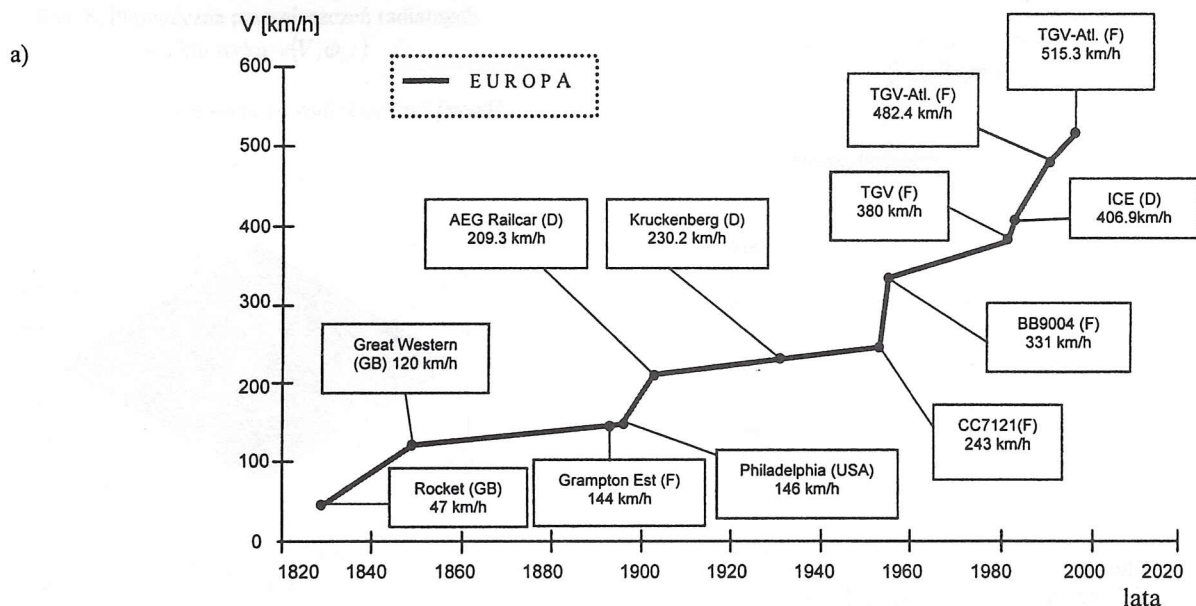
Naturalne dążenie człowieka do skracania czasu podróżowania oraz konkurencyjność innych rodzajów transportu zmusza kolej do zwiększenia prędkości jazdy pociągów. Wysiłki konstruktorów, wykorzystujących najnowsze osiągnięcia nauki i techniki, owocują rekordami prędkości jazdy (rys. 1.1). Doświadczenia zdobyte przy biciu rekordów wykorzystywane są do podwyższania prędkości jazdy eksploatowanych pociągów.

Zwiększa to udział oporów aerodynamicznych w całkowitych oporach ruchu (rys. 1.2). W pociągach jadących

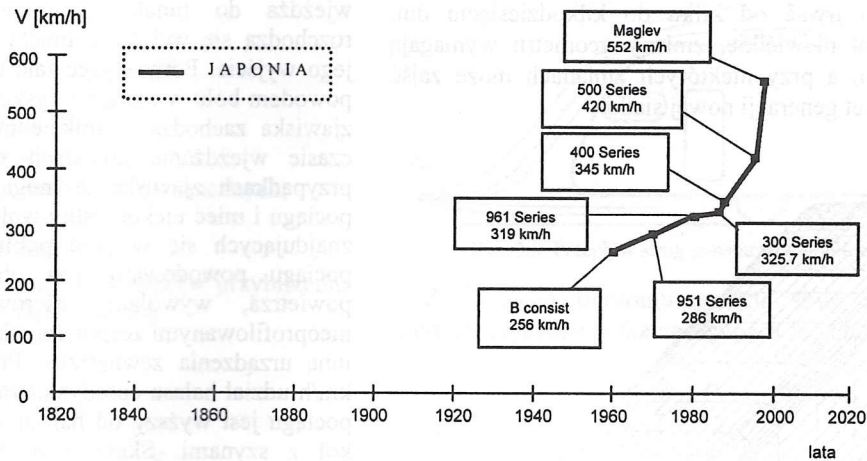
z dużą prędkością opory powietrza przewyższają wszystkie pozostałe opory ruchu.

Taki stan rzeczy powoduje, że konieczne stają się wszechstronne badania aerodynamiczne pojazdów oraz złożonych z nich pociągów.

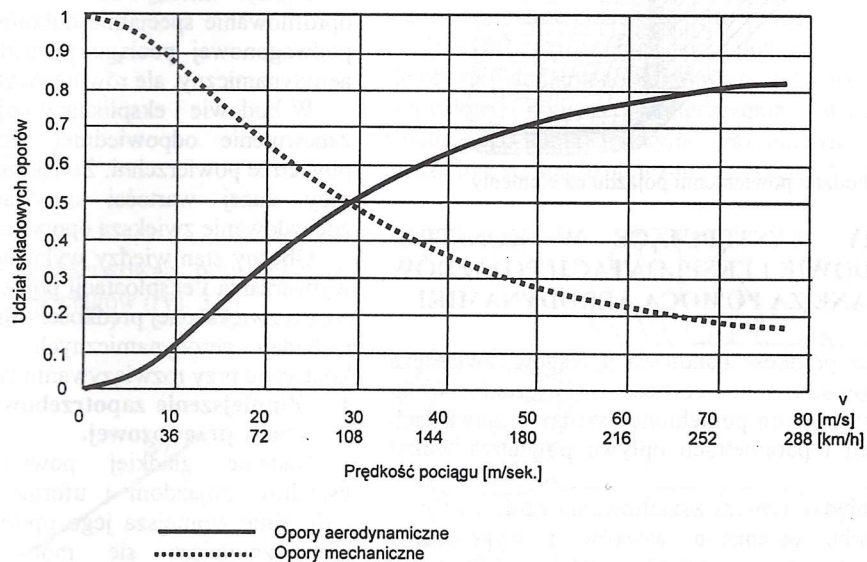
Pociągi dużej prędkości zaczęły z powodzeniem konkurować z samolotami latającymi na trasach kontynentalnych, zwłaszcza europejskich. Sumaryczny czas podróży na odległość do ok. 800 km, jest podobny dla samolotu i pociągu. Natomiast podróż pociągiem jest znacznie mniej kosztowna niż samolotem. Konkurencja między transportem lotniczym i kolejowym na małe i średnie odległości będzie nadal trwać.



b)



Rys. 1.1. Rekordy prędkości pociągów



Rys. 1.2. Udział oporów aerodynamicznych i mechanicznych w oporach ruchu pociągu

2. CEL BADAŃ AERODYNAMICZNYCH

Istnieje dość powszechne przekonanie, że aerodynamika służy wyłącznie do zmniejszenia oporów ruchu poprzez racjonalny wybór kształtów zewnętrznych pojazdów i pociągów. Stanowi to duże zawężenie problemu.

Badania aerodynamiczne-teoretyczne i doświadczalne-umożliwiają:

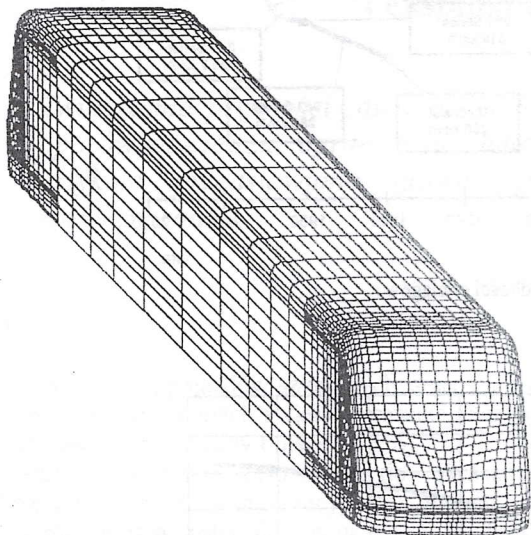
- zmniejszenie oporów powietrza,
- ograniczenie hałasu,
- zapewnienie bezpieczeństwa ruchu pociągu,
- polepszenie odbioru prądu,
- zwiększenie efektywności chłodzenia silników trakcyjnych oraz wentylacji hamulców,
- zwiększenie stateczności jazdy i inne.

Najnowsze teoretyczne badania aerodynamiczne oparte są o metody numerycznej mechaniki płynów. Stosuje się je w początkowej fazie projektowania kształtów pojazdów, kiedy trzeba wybierać i optymalizować rozwiązania konstrukcyjne.

Badania doświadczalne-przeprowadzone głównie w tunelach aerodynamicznych, w czasie których wyznacza się współczynniki aerodynamiczne - służą weryfikacji obliczeń i dopracowaniu konstrukcji. Ułatwiają one również wyjaśnienie tych zjawisk, których matematyczne modelowanie jest niecelowe.

Od kilkunastu lat, na skutek rozwoju numerycznej mechaniki płynów oraz dostępu do coraz potężniejszych komputerów, obydwie metody badań: numeryczna i eksperymentalna wzajemnie się uzupełniają. Rozwiązania numeryczne nie są jednak tanie. Budowa złożonej geometrii jest czasochłonna oraz wymaga wykwalifikowanego i

sprawnego użytkownika. W zależności od szczegółowego podziału powierzchni na siatkę elementów (rys. 2.1) obliczenia mogą trwać od kilku do kilkudziesięciu dni. Wszystkie, nawet niewielkie, zmiany geometrii wymagają nowych obliczeń, a przy niektórych zmianach może zająć konieczność nawet generacji nowej siatki.



Rys. 2.1. Podział powierzchni pojazdu na elementy

3. PROBLEMY WYSTĘPUJĄCE W KONSTRUOWANIU, BUDOWIE I EKSPLOATACJI POJAZDÓW ROZWIĄZYWANE ZA POMOCĄ AERODYNAMIKI

Wciąż rosnąca prędkość handlowa pociągów, zwłaszcza pasażerskich, powoduje konieczność rozwiązania wielu problemów wymagających pogłębionej wiedzy o zjawiskach aerodynamicznych i parametrach opływu powietrza wokół pojazdów [4, 5].

Dotyczy to między innymi kształtowania czoła i spływu pociągów, sposobu osłaniania wózków i wyposażenia podwagonego, formowania przejść międzywagonowych i innych rozwiązań konstrukcyjnych, mających istotny wpływ na opory, aerodynamiczne pojazdów. Projektowanie pantografów, lokalizacja wlotów i wylotów wentylacyjnych silników trakcyjnych i systemów klimatyzacyjnych wymagają gruntownej znajomości rozkładów ciśnień i prędkości wokół poruszającego się pociągu. Ograniczenie hałasu i niekorzystnych zjawisk zachodzących w trakcie

mijania się pociągów lub przy wjeździe do tunelu nie może również odbyć się bez udziału aerodynamiki. Kiedy pociąg wjeżdża do tunelu, generuje fale ciśnieniowe, które rozchodzą się wewnątrz tunelu, a następnie odbijają się o jego wyjście. Powracające fale obijają się o pociąg, co jest powodem bólu w uszach i dyskomfortu pasażerów. Podobne zjawiska zachodzą w trakcie mijania się pociągów lub w czasie wjeżdżania do stacji podziemnej. W niektórych przypadkach zjawiska te mogą naruszać stabilność jazdy pociągu i mieć niekorzystny wpływ na bezpieczeństwo ludzi znajdujących się w jego pobliżu. Hałas aerodynamiczny pociągu powodowany jest obszarami dużej turbulencji powietrza, wywołanej nierównościami powierzchni i nieprofilowanymi zespołami takimi, jak wózki, pantografy i inne urządzenia zewnętrzne. Przy prędkości powyżej 350 km/h udział hałasu aerodynamicznego w całkowitym hałasie pociągu jest wyższy od hałasu spowodowanego współpracą kół z szynami. Skutecznym środkiem obniżenia hałasu wewnątrz i na zewnątrz pociągu jest odpowiednie oprofilowanie wózków, pantografów i przejść międzywagonowych tak, aby ukierunkować przepływ i zmniejszyć intensywność śladów wirowych. Odpowiednie oprofilowanie specjalnie dobranymi ekranami boków części podwagonej pociągu pozwala obniżyć nie tylko hałas aerodynamiczny, ale również wytłumić inne źródła hałasu.

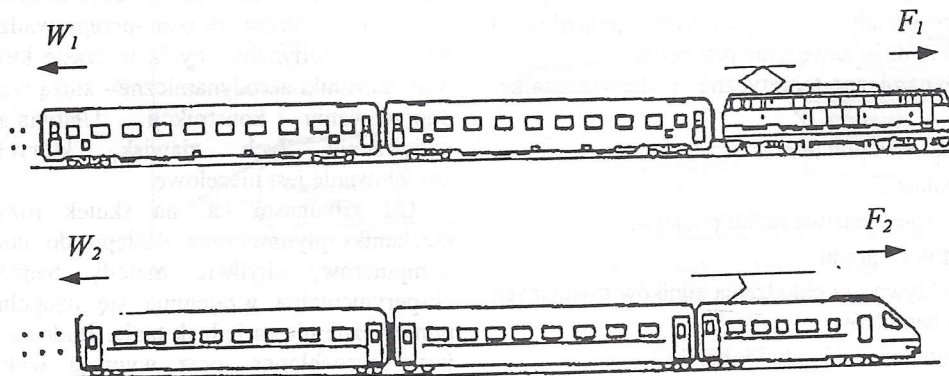
W budowie i eksploatacji pojazdów ważne znaczenie ma zapewnienie odpowiedniej gładkości omywanych przez powietrze powierzchni. Zwiększona chropowatość pojazdów, przy dużej wartości omywanej powierzchni pociągu, zdecydowanie zwiększa opory tarcia powietrza.

Obecny stan wiedzy wykazuje, że proces projektowania, wytwarzania i eksploatacji pojazdów szynowych - zwłaszcza tych o zwiększonej prędkości - nie może się obejść bez analiz i badań aerodynamicznych. W szczególności są one konieczne przy rozwiązywaniu takich zagadnień jak:

1) Zmniejszenie zapotrzebowania energii na wykonanie pracy przewozowej.

Nadanie gładkiej powierzchni oraz opływowych kształtów pojazdom i uformowanie ich pociągowi radykalnie zmniejsza jego opory ruchu. Proporcjonalnie do nich zmniejsza się moc zainstalowanych silników trakcyjnych.

Na rys. 3.1 przedstawiono dwa pociągi. Pierwszy z nich to powszechnie stosowany pociąg składający się z lokomotywy i zwykłych wagonów doczepnych. Siłę potrzebną do jego napędu oznaczono F_1 , natomiast opory jazdy przez W_1 . Odpowiednie wielkości dla drugiego pociągu, zaprojektowanego i wykonanego z uwzględnieniem wymagań aerodynamiki, oznaczono przez F_2 i W_2 .



Rys. 3.1. Powszechnie stosowany pociąg oraz pociąg wykonany z uwzględnieniem aerodynamiki

Jazda pociągu jest możliwa wówczas, gdy spełniona jest następująca zależność

$$F \geq W = W_m + W_a = W_m + C_x \frac{\rho v^2}{2} S$$

gdzie:

W_m - opór mechaniczny [kN],
 W_a - opór aerodynamiczny [kN],
 C_x - współczynnik oporów aerodynamicznych,
 ρ - gęstość powietrza [kg/m^3],
 v - prędkość pociągu [m/s],
 S - powierzchnia charakterystyczna (w przybliżeniu przekrój poprzeczny pojazdu) [m^2].

Dla pierwszego pociągu będzie:

$$F_1 = W_1 = W_{m_1} + C_{x_1} \frac{\rho v_1^2}{2} S$$

Dla drugiego pociągu:

$$F_2 = W_2 = W_{m_2} + C_{x_2} \frac{\rho v_2^2}{2} S$$

Przy czym

$$W_{m_1} \approx W_{m_2}$$

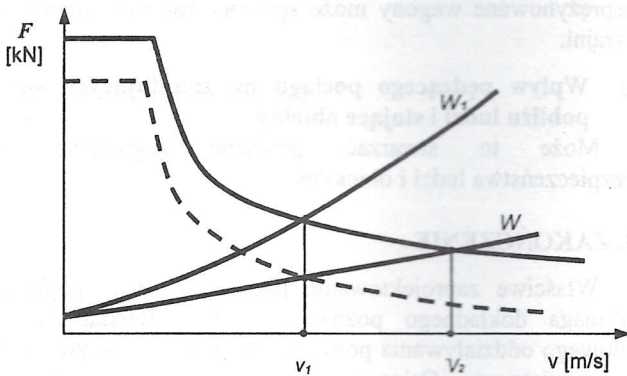
Natomiast

$$C_{x_1} \gg C_{x_2}$$

Stąd

$$F_1 \gg F_2$$

Konsekwencje tego można zaobserwować przy analizie charakterystyk trakcyjnych tych pociągów (rys. 3.2)

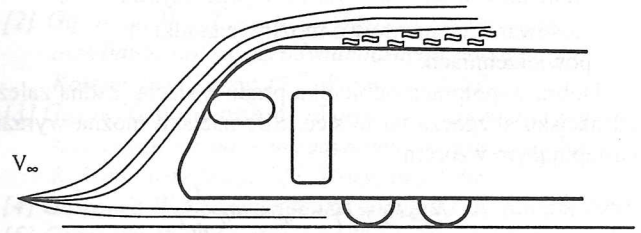


Rys. 3.2. Charakterystyki trakcyjne pociągów

Przy mocy silników trakcyjnych pierwszego pociągu, która umożliwia rozwinięcie siły pociągowej F_1 i powstających oporach W_1 może on uzyskać prędkość v_1 . Przy takiej samej mocy i zmniejszonych oporach W_2 pociąg może osiągnąć prędkość v_2 . Jeśli nie ma potrzeby zwiększenia prędkości do v_2 lecz wystarczy prędkość v_1 , to przy oporze W_2 można zainstalować silniki trakcyjne mniejszej mocy, które umożliwią rozwinięcie siły F_2 .

2) Efektywne chłodzenie silników trakcyjnych.

Przepływ powietrza w pobliżu pojazdu, poczynając od czoła, ma najpierw charakter laminarny a następnie przechodzi on w turbulentny (rys. 3.3).



Rys. 3.3. Przepływ strug powietrza w pobliżu pojazdu

Z równania Bernoulli'ego dla strug powietrza, jakie omywają pojazd, wynika następująca zależność

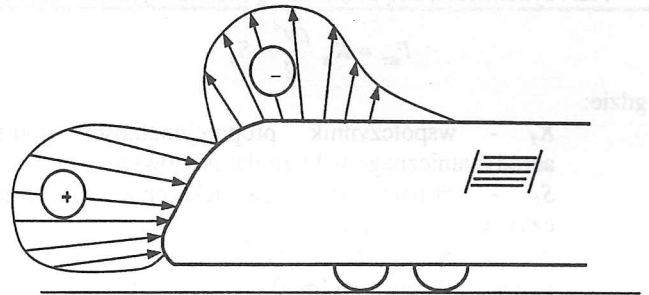
$$\rho \frac{v_s^2}{2} + p = const$$

gdzie:

v_s - prędkość strugi powietrza [m/s],

p - ciśnienie powietrza na powierzchni pojazdu [MPa].

Z powyższego równania wynika, że jeśli wzrasta prędkość powietrza v_s , to maleje jego ciśnienie p lub jeśli wzrasta ciśnienie powietrza p , to zmniejsza się jego prędkość v_s . Zjawiska te powodują, że na powierzchni pojazdu tworzą się obszary dodatniego i ujemnego ciśnienia (rys. 3.4). Z tych względów miejsca umieszczenia wlotów powietrza chłodzącego silniki trakcyjne oraz inne maszyny i aparaturę muszą być starannie obliczone i dobrane.



Rys. 3.4. Rozkład ciśnienia powietrza wokół pojazdu

Usytuowanie wlotów powietrza w obszarze ujemnego ciśnienia może zdecydowanie zmniejszyć skuteczność chłodzenia.

3) Zapewnienie stabilnej pracy odbieraków prądu (pantografów).

Właściwie zaprojektowany odbierak - zwłaszcza dla pojazdów dużej prędkości - powinien zapewnić dobrą współpracę z siecią jezdnią, niski poziom szumu oraz małe opory aerodynamiczne.

Złożona konstrukcja ramy, układu napędowego, ślizgacza i jego zawieszenia powodują znaczne opory aerodynamiczne, które głównie zależą od powierzchni czołowej odbieraka.

Mniejsze opory aerodynamiczne można uzyskiwać przez

- ograniczenie liczby ramion odbieraka lub takie ich rozmieszczenie, żeby nie powodowały zwiększenia powierzchni czołowej, czyli jedno za drugim,
- tworzenie węzłów konstrukcyjnych ramy o jak najmniej złożonej budowie, powodującej mniejsze zawirowania przepływu powietrza,

- stosowanie, w celu zmniejszenia powierzchni czołowej, elementów o jak najmniejszych przekrojach,
- stosowanie elementów o możliwie gładkich powierzchniach.

Dobra współpraca odbieraka prądu z siecią jezdnią zależy od nacisku ślizgacza na tę sieć. Siłę nacisku można wyrazić następującym wzorem

$$P = P_0 + P_I + P_{az} + m_0 \frac{d_z^2}{dt^2}$$

gdzie:

P_0 - nacisk sprężyn dociskających,
 P_I - siła tarcia w przegubach odbieraka,
 P_{az} - aerodynamiczna siła podnosząca,
 m_0 - masa zredukowana odbieraka,

$\frac{d_z^2}{dt^2} = a_z$ - pionowa składowa przyspieszenia ślizgu.

Suma algebraiczna P_0 i P_I jest to tzw. nacisk statyczny P_s :

$$P_s = P_0 + P_I$$

Można więc zapisać

$$P = P_s + P_{az} + m_0 a_z$$

Zależność ta wskazuje, iż jakość odbioru prądu zależy od nacisku statycznego, masy zredukowanej i siły aerodynamicznej. Siła ta jest ważnym czynnikiem zdecydowanie wpływającym na współpracę odbieraka z siecią trakcyjną.

Aerodynamiczną siłę podnoszącą można wyrazić wzorem

$$P_{az} = K_z \frac{\rho v^2}{2} \cdot S_s$$

gdzie:

K_z - współczynnik proporcjonalności oporu aerodynamicznego w kierunku pionowym,
 S_s - powierzchnia największego przekroju czołowego ślizgacza [m^2],
 ρ - gęstość powietrza [kg/m^3],
 v - prędkość pojazdu [m/s].

Siła aerodynamiczna działająca na odbierak nie może mieć zbyt dużej wartości, ponieważ zbyt mocno uniesiony odbierak mógłby uderzać o wysięgniki konstrukcji wsporczych. Oprócz tego za duża wartość składowej pionowej siły aerodynamicznej skierowanej do góry będzie powodowała intensywne zużywanie się przewodów jezdnych i nakładek stykowych.

Zbyt mała wartość siły aerodynamicznej może być niewystarczająca do kompensowania sił bezwładności, które powstają na skutek przemieszczeń pionowych elementów odbieraka.

Właściwą wartość siły aerodynamicznej, w szerokim zakresie prędkości, można uzyskać za pomocą ekranów aerodynamicznych, stałych lub ruchomych (sterowanych), zmniejszających kąt natarcia strug powietrza na odbierak zależnie od wysokości jego pracy. Siłę aerodynamiczną można zwiększyć lub zmniejszyć zabudowując na ślizgaczu odpowiednio wyprofilowany spojler.

Oprócz opisanych wyżej trzech zagadnień, istnieje szereg innych, które ze względu na rygory objętościowe materiałów konferencyjnych można tylko zasygnalizować. Należy do nich:

4) Zmniejszenie poziomu hałasu wewnątrz, jak i za zewnątrz pociągu.

Przy prędkościach przekraczających 200 km/h głównym źródłem hałasu, oprócz układu koło-szyna, jest opływ powietrza. Jego intensywność zależy od geometrii pojazdu, a szczególnie od powierzchni i kształtów jego przedniej i tylnej części.

5) Zmniejszenie amplitudy fal ciśnieniowych podczas przejazdu pociągu przez tunel.

Ma to zasadniczy wpływ na odczucie bólu w uszach i samopoczucie pasażerów. Podobnie jak z hałasem, główny wpływ na to ma geometria części czołowej i końcowej pociągu, stan powierzchni zewnętrznej całego składu oraz geometria tunelu.

6) Określenie minimalnej odległości między osiami równoległych torów.

Wzajemne oddziaływanie aerodynamiczne mijających się pociągów jest tak silne, iż nie uwzględnienie go może zagrażać bezpieczeństwu jazdy.

7) Optymalne ukształtowanie geometrii przedniej szyby pojazdu.

Ma ono wpływ nie tylko na opory i hałas, ale także umożliwia zminimalizowanie ilości uderzających o nią owadów i tym samym polepszenie widoczności.

8) Poprawa warunków klimatycznych pasażerów.

Wiąże się to z kontrolą i rozkładem pola prędkości i temperatury wewnątrz klimatyzowanych wagonów.

9) Utrzymaniem się pojazdów w skrajni taboru.

Oddziaływanie siłowe strumieni powietrza na miękko usprężynowane wagony może spowodować nie zachowanie skrajni.

10) Wpływ pędzącego pociągu na znajdujących się w pobliżu ludzi i stojące obiekty.

Może to stwarzać poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa ludzi i obiektów.

4. ZAKOŃCZENIE

Właściwe zaprojektowanie pociągu o dużej prędkości wymaga dokładnego poznania i uwzględnienia zjawisk siłowego oddziaływania pomiędzy pojazdami i opływającym je powietrzem. Osiągnięcie jak największej prędkości pociągów jak najmniejszym kosztem sprowadza się do tego, że muszą one być przede wszystkim aerodynamiczne, aby opór powietrza powstający podczas ich ruchu był jak najmniejszy. Z tego względu wszystkie pociągi o dużej prędkości mają gładze powierzchnie i mniej załamań konstrukcyjnych niż pociągi konwencjonalne. Optymalizacja kształtów pociągów już na etapie projektowania stała się obecnie możliwa dzięki powstaniu komputerów dużej mocy oraz numerycznej mechaniki płynów. W projektowaniu współczesnych konstrukcji środków transportu (samolotów, samochodów, wagonów i lokomotyw) w dużym stopniu korzysta się z techniki komputerowej. Dzięki temu uzyskuje się znaczne przyspieszenie procesu projektowania. Umożliwia to również optymalizację konstrukcji i jej badań, takich jak własności aerodynamiczne. W tej dziedzinie w coraz większym zakresie kosztowne i długotrwałe badania

eksperymentalne zastępowane są symulacją komputerową. Obecnie metody obliczeniowe aerodynamiki pozwalają coraz dokładniej badać przepływy o nawet bardzo złożonej strukturze. Jednak w dalszym ciągu, równoległe z badaniami teoretycznymi, prowadzi się badania eksperymentalne w tunelach powietrznych, które umożliwiają wyznaczenie współczynników aerodynamicznych oraz weryfikację wyników badań.

5. LITERATURA

[1] Gąsowski W.: *Calculation of Motion Aerodynamic Drag*

of Rail Vehicles Incorporated in Draft of Cars. Archives of Transport. Vol. 5, Warsaw 1993, iss. 1□4.

[2] Gąsowski W., Baron A.: *Podstawy teoretyczne i metody określania oporu aerodynamicznego pociągu. Problemy Kolejnictwa. Zeszyt 126, Warszawa 1997.*

[3] Gąsowski W., Baron A.: *Wpływ ukształtowania pojazdów szynowych na opór aerodynamiczny pociągu. Problemy Kolejnictwa. Zeszyt 127, Warszawa 1998.*

[4] Gąsowski W.: *Aerodynamika pociągu ITE. Radom 1998.*

[5] Gąsowski W.: *Structure of the train aerodynamic drag. Archives of Transport. Vol. 12, Warsaw 2000, iss. 4.*

[6] Piechna J.: *Podstawy aerodynamiki pojazdów. WKŁ. Warszawa 2000.*